

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201803049

大牛地气田区地下水水质模糊综合评价

梁乃森^{1,2}, 钱程³, 穆文平¹, 段扬¹, 朱阁¹, 张日升⁴, 武雄¹

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国地质灾害防治工程行业协会, 北京 100043; 3. 深圳市大鹏新区住房和建设局, 广东深圳 518116; 4. 鄂尔多斯市东辰煤炭有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 010300)

摘要: 自 20 世纪 20 年代以来, 出现了 30 多种水质评价的研究方法。但由于水质等级与评价因子间复杂的非线性关系, 以及水体污染的模糊性和随机性, 地下水水质评价至今没有一个被广泛接受的评价模型。现阶段, 地理信息系统 (GIS) 技术被广泛应用到水质评价中, 在此基础上提出了一系列新的水质评价模式和理论。文章以大牛地气田区浅层地下水为研究对象, 利用 ArcGIS 技术, 将 GIS 与改进的模糊综合评价模型结合, 建立基于 GIS 的地下水水质模糊综合评价模型, 并应用于研究区地下水水质评价。同时将基于 GIS 的模糊综合评价结果和传统的内梅罗指数法进行对比, 验证新方法在地下水水质评价工作中的合理性与可靠性。结果表明: (1) 大牛地气田浅层地下水水质状况总体良好, 以 I 类和 III 类水为主, 局部地区浅层地下水中氨氮超标, 水质较差; (2) 模糊综合评价法与 GIS 的有效结合, 实现了地下水水质模糊综合评价的系统化和可视化; (3) 相对于内梅罗指数法, 基于 GIS 的地下水水质模糊综合评价模型综合考虑了各评价因子对水质的影响, 能够更加客观、合理地评价研究区地下水水质。

关键词: GIS; 浅层地下水; 水质评价; 模糊综合评价; 大牛地气田

中图分类号: P641.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)03-0052-08

Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality of the Daniudi gas field area

LIANG Naisen^{1,2}, QIAN Cheng³, MU Wenping¹, DUAN Yang¹, ZHU Ge¹, ZHANG Risheng⁴, WU Xiong¹

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. China Association of Geological Hazard Prevention, Beijing 100043, China; 3. Housing and Construction Bureau of Dapeng New District, Shenzhen, Guangdong 518116, China; 4. Eerduosi Dongchen Coal, LLC, Eerduosi, Inner Mongolia 010300, China)

Abstract: Since the 1920s, there have been more than 30 research methods for water quality assessment worldwide. However, there is no widely accepted evaluation model for groundwater quality evaluation because of the complex nonlinear relationship between water quality grade and evaluation factors, as well as the fuzziness and randomness of water pollution. At present, geographic information system (GIS) technology is widely used in water quality evaluation, and on this basis, a series of new models and theories of water quality evaluation have been put forward. This article takes the Daniudi gas field shallow groundwater as the research object. ArcGIS technology is adopted to integrate GIS with an improved fuzzy comprehensive evaluation model. Therefore, a groundwater quality fuzzy comprehensive evaluation model based on GIS can be created and applied to the groundwater quality evaluation of the research area. In order to verify the rationality and reliability of groundwater quality evaluation, the fuzzy comprehensive evaluation results based on GIS are

收稿日期: 2019-04-15; 修订日期: 2019-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572227)

第一作者: 梁乃森(1986-), 女, 博士, 主要从事水文地质与工程地质研究。E-mail: liangnaisen@126.com

compared with those with the Nemero index method. The results show that (1) the quality of shallow groundwater in the Daniudi gas field is generally good, and is mainly in class I and class III, but the shallow groundwater in some local areas is polluted by nitrogen from domestic sewage, agricultural wastewater and livestock sewage. (2) An effective integration of fuzzy comprehensive evaluation model (FCEM) and GIS combined effectively, and the combination makes FCEM have powerful map display and spatial analysis functions, which make the systematization and visualization of fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality to be realized. (3) Compared with the Nemero index method, the fuzzy comprehensive evaluation model of groundwater quality based on GIS can evaluate the quality level of the collected groundwater with reasonable accuracy.

Keywords: GIS; shallow groundwater; water quality evaluation; fuzzy comprehensive evaluation; Daniudi gas field

水质评价是水资源评价的重要内容之一,也是水资源规划利用和管理的重要依据。自20世纪70年代以来,地下水环境质量研究越来越多,地下水水质评价工作由单因子评价到综合评价,由数理统计到建立数学模型,评价方法和体系日趋完善^[1-2]。近年来,模糊评价^[3-5]、人工神经网络^[6]、灰色系统理论^[7]、层次分析法^[8]、集对分析法^[9]、物元可拓法^[10]等模型或方法被引入水质评价中,以期取得更全面的评价结果。模糊评价法是由美国 Zadeh 教授于1965年在模糊数学理论的基础上开发的^[11],它充分考虑了地下水水质指标分类界限的过渡,结果更加科学准确^[12]。随着地理信息系统(GIS)技术的发展,GIS技术在水资源研究领域的应用越来越广泛^[13-15]。刘明柱等^[16]运用GIS建立了考虑各子系统影响的地下水资源评价系统,对安徽省天长市地下水资源进行了富水性评价;刘明柱等^[17]提出基于GIS结构的集成框架,将地下水资源评价模型与GIS紧密集成,并将其成功应用于哈尔滨市水资源管理。在水质评价方面,GIS技术与水质评价模型或方法的结合已经成为重要的发展趋势,有许多学者做了有益的尝试。万幼川等^[18]在GIS支持下应用BP改进模型对东湖水质、富营养化情况进行了综合评价,并实现了结果的可视化输出;苏耀明^[19]在ArcGIS平台上实现了鄂尔多斯盆地三层地下水水质模糊综合评价结果的可视化表达;张成才等^[20]利用数据库系统实现了GIS与模糊综合评价模型之间的数据交换,将三者系统整合,并运用该系统对地表河流水质进行了评价;罗畏^[21]通过Matlab编程和组件式GIS开发将GIS与投影寻踪模型集成,应用于地表水体环境质量研究;Venkatramanan等^[22]利用GIS平台实现了模糊集理论对地下水水质现状的评价。虽然前人在GIS与水质评价方法结合研究和应用方面取得了一定

的进展^[19-24],但忽略了水质数据的非连续性,对于地区尺度的基于GIS的地下水水质模糊综合评价研究较少。本文利用地理信息系统(GIS)技术和Visual Basic for Applications(VBA)技术实现水质模糊综合评价模型,既考虑了地下水水质数据的非连续性,又使评价过程系统化、结果可视化,利用该方法对毛乌素沙地大牛地气田区浅层地下水环境质量进行比较客观的评价,为该区地下水资源的开发利用和保护提供科学依据。

1 研究区概况与数据获取

1.1 研究区概况

大牛地气田位于毛乌素沙地东北部,内蒙古自治区与陕西省交界处(图1)。研究区面积约为2 322.4 km²,地势平坦,地形完整,东北部为基岩剥蚀



图1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

波状高原,西北部及南部为固定半固定沙丘地貌。其气候属于暖温带和温带半干旱大陆性季风气候,多年平均降水量约 400 mm,多年平均蒸发量为 2 485.2 mm。区内最大的地表水体为红碱淖,最大的河流为流入红碱淖的扎萨克河(已多年断流)。研究区具有供水意义的含水系统为第四系孔隙含水系统和白垩系下统孔隙裂隙含水系统,二者水力联系较密切。第四系孔隙水主要接受大气降水补给和侧向径流补给,局部地段存在顶托补给。白垩系孔隙裂隙水主要受第四系下渗补给和大气降水补给,其次是侧向补给。浅层地下水径流情况见图 2。地形低洼处和湖泊是研究区地下水主要排泄点,蒸发排泄为主要的排泄方式。由于研究区地表水水质较差,浅层地下水成为该区主要供水水源。

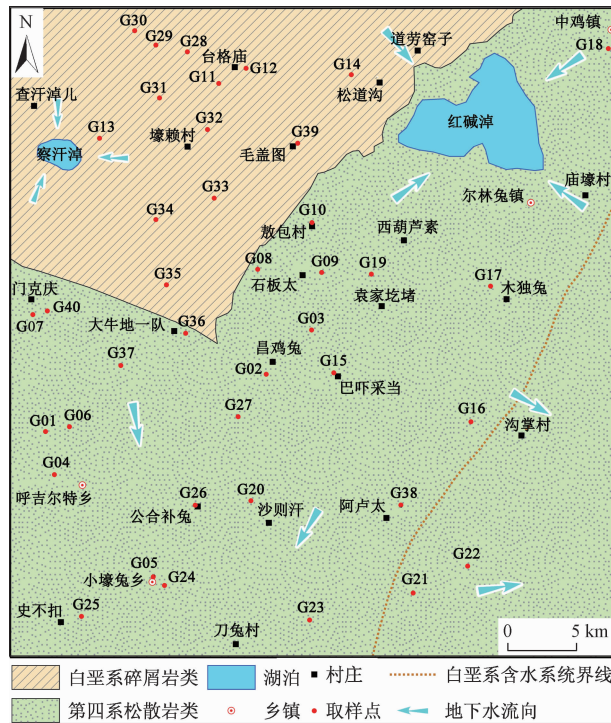


图 2 研究区地下水采样点位图

Fig. 2 Groundwater sampling sites in the study area

1.2 数据来源

为确保地下水样品均来自浅层地下水,于 2012 年 10 月选取 40 个具有代表性的居民水井进行水样采集,采样点平面位置见图 2。

依据《地下水环境监测技术规范》^[25],对所有样品进行室内水质检测分析。测试均在谱尼测试科技有限公司进行。总硬度(TH)采用 EDTA-2Na 法测定,溶解性总固体(TDS)采用多参数水质分析仪测定,氨氮

(NH_4^+)和氯化物(Cl^-)均采用原子荧光分光光度法测定,硫酸盐(SO_4^{2-})采用离子色谱法测定,氟化物(F^-)采用氟试剂分光光度法测定,高锰酸盐指数(I_{Mn})采用酸性高锰酸钾法测定,硝酸盐氮(NO_3^-)采用铬酸钡分光光度法进行测定。

测试得到研究区地下水水化学数据,部分水化学指标的统计特征值见表 1。

表 1 水化学分析结果统计特征值

Table 1 Statistical characteristics of the hydrochemical data

水化学指标	样品数 <i>n</i>	最小值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	最大值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	平均值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	标准差/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	偏度
TH	40	22	499	202.77	93.01	1.31
TDS	40	153	811	291.80	132.11	2.07
NH_4^+	40	0.02	1.61	0.13	0.28	4.06
SO_4^{2-}	40	1.16	70.0	26.93	20.17	0.68
Cl^-	40	3.59	115	17.52	22.13	2.80
F^-	40	0.09	0.61	0.29	0.11	0.59
I_{Mn}	40	0.24	3.76	1.23	0.81	1.41
NO_3^-	40	0.04	42.8	5.53	10.52	2.59

2 研究方法

2.1 模糊综合评价法

模糊综合评价法基本原理为:以隶属度描述地下水水质指标的模糊界限,模糊评价的结果由评价因子的权重矩阵和隶属度组成的模糊关系矩阵决定。模糊综合评价的一般步骤见图 3,其中核心的内容是模糊关系矩阵和权重向量的确定。

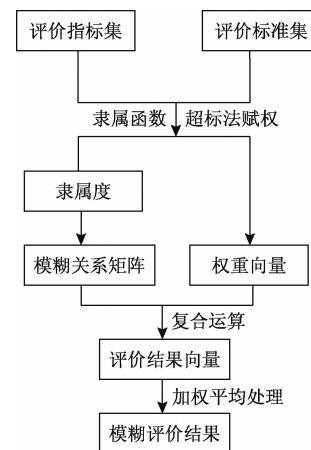


图 3 模糊评价法一般步骤

Fig. 3 General steps of fuzzy evaluation

2.1.1 隶属度及模糊关系矩阵的确定

模糊关系矩阵由各指标的隶属度构成。隶属度表示评价指标属于各评价标准(级别)的程度,由隶属度

函数计算得出。目前,隶属度函数的确定还未形成一套成熟的方法,一般水质模糊评价的隶属度函数采用分级函数法确定。分级函数包括三角形函数法和梯形函数法,其中降半梯形分布函数符合水质评价特点,即指标越小越好。参考前人经验^[4],本文选用降半梯形函数构造隶属度函数,具体隶属度函数公式如下:

对 I 级水的隶属度函数:

$$r_{i1} = \begin{cases} 1 & C_i \leq S_{i1} \\ \frac{S_{i2} - C_i}{S_{i2} - S_{i1}} & S_{i1} < C_i < S_{i2} \\ 0 & C_i \geq S_{i2} \end{cases} \quad (1)$$

对 II ~ IV 级水的隶属度函数:

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{C_i - S_{ij-1}}{S_{ij} - S_{ij-1}} & S_{ij-1} < C_i < S_{ij} \\ \frac{S_{ij+1} - C_i}{S_{ij+2} - S_{ij+1}} & S_{ij} \leq C_i \leq S_{ij+1} \\ 0 & C_i \geq S_{ij+1} \text{ or } C_i \leq S_{ij-1} \end{cases} \quad (2)$$

对 V 级水的隶属度函数:

$$r_{i5} = \begin{cases} 1 & C_i \geq S_{i5} \\ \frac{C_i - S_{i4}}{S_{i5} - S_{i4}} & S_{i4} < C_i < S_{i5} \\ 0 & C_i \leq S_{i4} \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_i ——第 i 个评价指标的实测浓度, $i = 1, 2, \dots, m$;

j ——水质等级, I ~ V 级水 j 对应 1 ~ 5;

S_{ij} ——第 i 个评价指标的 j 级标准值;

R_{ij} ——第 i 个评价指标对 j 级水的隶属度。

对于不同级别标准值相同的情况,参照从优不从劣的原则确定其隶属度。对于给定的浓度值按照以上隶属度函数计算隶属度, $i \times j$ 阶的模糊关系矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{i1} & r_{i2} & r_{i3} & r_{i4} & r_{i5} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} & r_{m4} & r_{m5} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.1.2 评价指标权重的确定

确定权重的方法有多种,如主成分分析法、超标法、层次分析法等^[26],如何合理确定各评价指标的权重值,目前没有统一的方法,比较常用的是超标法。超标法根据评价指标超标程度大、权重大的原则确定权重,采用超标法确定评价指标权重:

$$W_i = \frac{\frac{C_i}{S_{i0}}}{\sum_{i=1}^m \frac{C_i}{S_{i0}}} \quad (5)$$

式中: W_i ——第 i 个评价指标的权重值;

C_i ——第 i 个评价指标的实测浓度;

S_{i0} ——第 i 个评价指标各级标准值的平均值;

m ——评价指标个数。

根据式(5)求出每个评价指标的权重值,组成权重向量或权重矩阵 A :

$$A = \{W_1, W_2, \dots, W_m\} \quad (6)$$

2.1.3 矩阵复合运算及处理

矩阵复合运算包括 4 种模型^[27],其中加权平均模型的运算模型既强调了最大浓度指标的影响,又兼顾所有参评因子(或指标)应有的作用,避免了在模糊矩阵的复合运算中部分数据丢失造成的不利影响。确定模糊关系矩阵 R 和权重矩阵 A 后,选择加权平均型运算模型对权重矩阵 A 和模糊关系矩阵 R 进行复合运算,得到模糊评价结果矩阵 B 。

模糊评价结果矩阵 B 的最常用处理方法是最大隶属度原则,但此方法存在有效性问题,特殊情况下可能得出不合理的评价结果^[28]。因此采用加权平均原则^[29],被评事物的相对位置,即评价结果,可表示为:

$$G = \frac{\sum_{j=1}^c j \cdot b_j^k}{\sum_{j=1}^c b_j^k} \quad (7)$$

式中: b_j ——隶属于第 j 等级的隶属度;

k ——待定系数($k = 2$);

G ——模糊评价结果。 G 值与地下水水质级别的对应关系见表 2^[20-23]。

表 2 G 值与地下水水质级别的对应关系

Table 2 Corresponding relationship between G value and groundwater quality level

级别	I	II	III	IV	V
G 值	< 1.5	1.5 ~ 2.5	2.5 ~ 3.5	3.5 ~ 4.5	> 4.5

2.2 GIS 与模糊综合评价模型结合

模糊综合评价模型只能对水化学数据(即属性数据)进行处理,不能增加或修改空间数据,而 GIS 可以创建或修改空间数据。利用 ArcGIS 平台采集和编辑空间数据,并将水样点的属性数据与空间数据结合,使属性数据空间可视化,以利于评价结果的综合分析。空间数据与 Excel 表中水化学数据通过 ArcGIS 图层连接功能结合后,对 Excel 表中的数据进行处理可以修

改相应的属性数据。

GIS 和模糊综合评价模型结合,可以将 GIS 的空间分析功能、显示功能以及模糊综合评价方法的计算功能整合在一起。GIS 与地下水水质模糊综合评价模型结合后具备强大的地图显示功能,地下水水质评价和结果分析更为方便。水质评价集成于地理信息系统,可为水资源的开发利用和保护提供决策支持。

2.3 评价指标及标准确定

结合研究区的实际情况,选取对水环境影响较大的水质指标进行评价,包括:总硬度(TH)、溶解性总固体(TDS)、氯化物(Cl^-)、氟化物(F^-)、硝酸盐氮(NO_3^-)、氨氮(NH_4^+)、硫酸盐(SO_4^{2-})、高锰酸盐指数(I_{Mn})等,共 8 项。评价标准参照《地下水质量标准》^[30]。

3 结果与讨论

3.1 评价结果

利用 ArcGIS 的地图显示与制图功能,对评价结果进行显示和出图,并结合空间数据对评价结果进行分析。经过 ArcGIS 处理,得到研究区地下水水质评价结果见图 4。

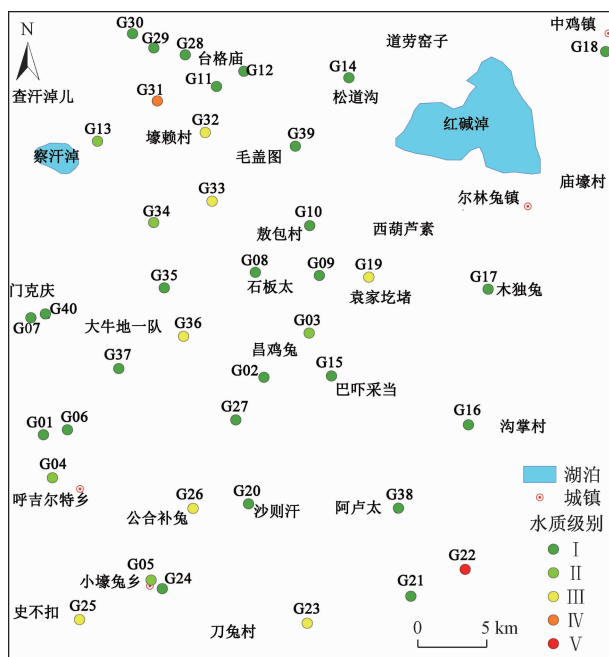


图 4 研究区地下水水质模糊综合评价结果

Fig.4 Fuzzy comprehensive evaluation results of groundwater quality in the study area

由图 4 可知,研究区浅层地下水水质总体较好,局部地点浅层地下水水质较差,水质级别在Ⅳ类以下。

利用 ArcGIS 对模糊评价结果(图 4)进行统计,可知Ⅰ类水分布最广,占地下水取样点总数的 65.0%,主要分布于台格庙—松道沟—敖包村—昌鸡兔一带,呼吉尔图乡以北门克庆—大牛地一带,沙则汗—阿卢太—沟掌村以北,小壕兔乡东南,以及尔林兔镇东南;研究区Ⅱ类浅层地下水水样点有 5 个,占地下水取样点总数的 12.5%,分别位于研究区西北的查汗淖儿村、壕赖村西南部,研究区西南部的呼吉尔特村、小壕兔乡小壕兔村,以及石板太南部;Ⅲ类水水样点共有 7 个,分别位于壕赖村东北,西葫芦素南部,大牛地一队,史不扣村附近,以及研究区南部的采气四队,占地下水取样点总数的 17.5%;Ⅳ类水和Ⅴ类水水样点仅有 2 处,分别位于察汗淖四队(G31)及许记海子(G22 监测点)附近,共占地下水取样点总数的 5.0%。根据模糊综合评价结果,研究区Ⅲ类以上浅层地下水水样点约占总数的 95.0%,所以研究区浅层地下水水质状况总体良好。

3.2 讨论

结合单项指标数据及空间位置分析,局部地区(G19、G22、G23、G25、G26、G31、G32、G33、G36 监测点附近)浅层地下水水质相对较差主要是因为地下水中氨氮(NH_4^+)或硝酸盐氮(NO_3^-)含量超标。这些地区人口比较密集且地下水防护措施较差,农业施肥、人畜生活污水排放使含氮物质进入土壤及地表水后通过下渗等方式进入地下水,造成地下水水质指标超标。从水文地质条件看,超标相对较严重的点(G31、G32、G33)位于白垩系碎屑岩岩类出露区,地下水流速较缓慢,蒸发浓缩作用强烈,水去盐留,使得局部地区地下水水质较差。结合野外调查结果,超标最严重的 G22 点(许记海子)处于局部地下水系统的排泄区,周边放牧产生的污染物通过地表漫流和地下水流动在排泄区汇集累积,使该处地下水三氮超标严重。评价结果与实际污染情况比较吻合,验证了评价结果的有效性。

为进一步验证评价结果的合理性与可靠性,将基于 GIS 的模糊综合评价结果与《地下水质量标准》中的内梅罗指数法^[31](F 值法)评价结果(图 5)进行比较。从图上看,基于 GIS 的模糊综合评价结果整体上优于内梅罗指数法评价结果,但水质相对较差的位置大体一致。与内梅罗指数法相比,模糊综合评价结果的Ⅰ类和Ⅲ类水水样点数目明显较多,Ⅱ类和Ⅳ类水水样点明显较少,Ⅴ类水水样点所占比重也较小(表 3)。究其原因,是两种方法的原理不同造成的。内梅罗指数法放大了最大浓度因子的影响,使部分评价结

果偏高,而模糊综合评价法综合考虑了各评价因子对水质的影响,评价结果更客观、更合理。

4 结论

(1)基于 GIS 的地下水模糊综合评价结果,大牛地气田浅层地下水水质状况总体良好,水质级别以 I ~ III 类水为主,局部地区浅层地下水水质较差,水质级别在 IV 类以下。I 类水分布最广,占所取地下水总量的 65.0%,其次是 III 类水,其水样点数量占地下水取样点总数的 17.5%,II、IV、V 类地下水分别占地下水取样总量的 12.5%、2.5% 和 2.5%。

表 3 基于两种方法的评价结果对比

Table 3 Comparison of the evaluation results based on the two methods

水质类别	F 值法		模糊综合评价法	
	水样点/个	比例/%	水样点/个	比例/%
I	19	47.5	26	65.0
II	9	22.5	5	12.5
III	0	0	7	17.5
IV	8	20.0	1	2.5
V	4	10.0	1	2.5
总计	40	100	40	100

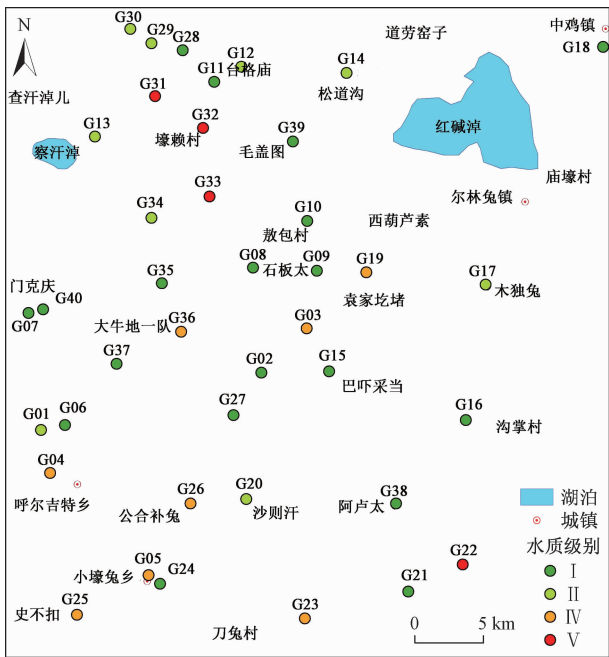


图 5 基于内梅罗指数法的水质评价结果

Fig.5 Evaluation results of groundwater quality based on the Nemero index method

(2)局部浅层地下水水质较差主要是由于地下水中氨氮或硝酸盐氮浓度超标,超标的主要原因是局部

地段浅层地下水受到人类生产生活污水中含氮物质的污染。

(3)通过对比分析可知,基于 GIS 的水质模糊综合评价方法实现了评价结果的系统化,可视化,能够较合理、客观地评价取样点地下水水质。同时,模糊综合评价法采用超标法确定评价指标的权重,虽然剔除了主观因素,但夸大了实测浓度大的指标影响,对其它指标兼顾不够,需进一步改进。

参考文献 (References):

[1] 房春生,孟赫,单玉书,等. 基于 GIS 的吉林省地下水水质模糊评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2011,41(增刊1):293-297. [FANG C S, MENG H, SHAN Y S, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality based on GIS of Jilin Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011,41(Sup 1):293-297. (in Chinese)]

[2] 徐力刚,叶昌,张奇,等. 基于模糊模式识别的地下水水质综合评价研究[J]. 水文地质工程地质,2011,38(5):7-12. [XU L G, YE C, ZHANG Q, et al. Application of fuzzy pattern recognition for the comprehensive assessment of groundwater quality[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(5): 7-12. (in Chinese)]

[3] Dahiya S, Singh B, Gaur S, et al. Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 147(3): 938-946. DOI:10.1016/j.jhazmat.2007.01.119.

[4] 高振凯,耿新新,海玮,等. 基于模糊综合评判的吴灵灌区地下水水质评价[J]. 人民黄河,2013,35(8):53-59. [GAO Z K, GENG X X, HAI W, et al. Groundwater Quality Evaluation Based on Fuzzy Synthesis in the Wuling Irrigation Area [J]. Yellow River, 2013,35(8):53-59. (in Chinese)]

[5] 涂向阳,高学平. 模糊数学在海水入侵地下水水质评价中的应用[J]. 水利学报,2003,34(8):64-69. [TU X Y, GAO X P. Application of fuzzy mathematical method in evaluation of seawater intrusion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003,34(8):64-69. (in Chinese)]

[6] 肖江,连生土. 基于 PNN 神经网络的地下水水质评价及应用[J]. 工程勘察,2012,40(9):48-50. [XIAO J, LIAN S T. Groundwater quality evaluation base on PNN and its application [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012,40(9):48-50. (in

- Chinese)]
- [7] 沃飞,陈效民,吴华山,等. 灰色聚类法对太湖地区农村地下水水质的评价[J]. 安全与环境学报, 2006,6(4):38-41. [WO F, CHEN X M, WU H S, et al. Application of grey clustering method to rural groundwater quality evaluation in Tai-Lake Region [J]. Journal of Safety and Environment, 2006,6(4): 38-41. (in Chinese)]
- [8] 庞振凌,常红军,李玉英,等. 层次分析法对南水北调中线水源区的水质评价[J]. 生态学报,2008,28(4): 1810-1819. [PANG Z L, CHANG H J, LI Y Y, et al. Analytical hierarchy process (AHP) evaluation of water quality in Danjiangkou reservoir-source of the middle line project to transfer water from south to north, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(4): 1810-1819. (in Chinese)]
- [9] 邱林,唐红强,陈海涛,等. 集对分析法在地下水水质评价中的应用[J]. 节水灌溉, 2007, (1): 13-15. [QIU L, TANG H Q, CHEN H T, et al. Application of set pair analysis method in the evaluation of groundwater quality [J]. Water Saving Irrigation, 2007, (1):13-15. (in Chinese)]
- [10] 汤洁,李艳梅,卞建民,等. 物元可拓法在地下水水质评价中的应用[J]. 水文地质工程地质,2005, 32(5):1-5. [TANG J, LI Y M, BIAN J M, et al. Application of matter-element and extension to groundwater quality evaluation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(5): 1-5. (in Chinese)]
- [11] 刘春风,翟瑞彩. 基于模糊数学的水质分析[J]. 天津大学学报,2002,36(1):72-73. [LIU C F, ZHAI R C. Analysis of water quality based on fuzzy mathematics [J]. Journal of Tianjin University, 2002, 36(1):72-73. (in Chinese)]
- [12] 张晓叶,张永祥,任仲宇,等. 不同地下水水质评价方法的比较及实例应用[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(2):98-101. [ZHANG X Y, ZHANG Y X, REN Z Y, et al. Comparison and practical example of assessment method in different groundwater qualities [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014,25(2):98-101. (in Chinese)]
- [13] 苏耀明,朱琳,苏小四,等. 基于 GIS 的鄂尔多斯白垩系盆地浅层地下水水质分布规律研究[J]. 水文地质工程地质,2009, 36(1):24-29. [SU Y M, ZHU L, SU X S, et al. A study of shallow groundwater quality distribution in the Ordos Cretaceous Artisan Basin based on GIS [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(1):24-29. (in Chinese)]
- [14] 邓非凡,邓正栋,段化杰,等. 基于遥感和 GIS 技术的朝阳地区浅层地下水富集性研究[J]. 水文地质工程地质,2016,43(6):21-26. [DENG F F, DENG Z D, DUAN H J, et al. Research on the shallow groundwater potentiality estimation in Chaoyang using remote sensing and GIS [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 21-26. (in Chinese)]
- [15] 曹峰,郑跃军. 基于 GIS 技术的人工补给地下水区域选择——以乌鲁木齐河流域乌拉泊洼地为例[J]. 水文地质工程地质,2015,42(6):44-50. [CAO F, ZHENG Y J. A study of suitable area selection for artificial recharge based on GIS Technology-Take Wulabo basin as case study [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(6): 44-50. (in Chinese)]
- [16] 刘明柱,陈鸿汉,叶念军,等. GIS 在区域地下水资源评价中的应用[J]. 水利学报,2002, (1): 52-55. [LIU M Z, CHEN H H, YE N J, et al. The application of GIS in regional water resources systematic evaluation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, (1):52-61. (in Chinese)]
- [17] 刘明柱,陈艳丽,胡丽琴,等. 地下水资源评价模型与 GIS 的集成及其应用研究[J]. 地学前缘, 2005, 12(增刊1):127-131. [LIU M Z, CHEN Y L, HU L Q, et al. The framework for integration of GIS with model of groundwater resources assessment and its application [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(Sup1):127-131. (in Chinese)]
- [18] 万幼川,谢鸿宇,吴振斌,等. GIS 与人工神经网络在水质评价中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(3): 7-12. [WAN Y C, XIE H Y, WU Z B, et al. Application of artificial neural network and GIS to water quality evaluation [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(3): 7-12. (in Chinese)]
- [19] 苏耀明. 基于 GIS 下的鄂尔多斯白垩系地下水盆地地下水水质的模糊综合评价[D]. 长春:吉林大学,2007. [SU Y M. Fuzzy synthetic evaluation of groundwater quality based on GIS in ordos cretaceous artisan basin [D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)]
- [20] 张成才,李红伟,吴瑞锋,等. 基于 GIS 的水质模糊综合评价方法研究[J]. 人民黄河,2009,31(5): 52-53. [ZHANG C C, LI H W, WU R F, et al. Fuzzy synthetic evaluation of groundwater quality

- based on GIS[J]. Yellow River, 2009, 31(5): 52 – 53. (in Chinese)]
- [21] 罗畏. GIS与投影寻踪模型在水质评价中的应用[D]. 长沙: 中南大学, 2011. [LUO W. The application of GIS and projection pursuit model on water quality assessment[D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese)]
- [22] VENKATRAMANAN S, CHUNG S Y, RAJESH R, et al. Comprehensive studies of hydrogeochemical processes and quality status of groundwater with tools of cluster, grouping analysis, and fuzzy set method using GIS platform: a case study of Dalcheon in Ulsan City, Korea[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(15): 11209–11223.
- [23] 翟俊, 何强, 肖海文, 等. 基于GIS的模糊综合水质评价模型[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(8): 49 – 53. [ZHAI J, HE Q, XIAO H W, et al. GIS-based fuzzy comprehensive water quality assessment model[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2007, 30(8): 49 – 53. (in Chinese)]
- [24] 李京, 蒋卫国, 陈云浩, 等. 基于GIS多源栅格数据的模糊综合评价模型[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(8): 1446 – 1450. [LI J, JIANG W G, CHEN Y H, et al. A fuzzy comprehensive assessment model for multi-raster data based on GIS[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(8): 1446 – 1450. (in Chinese)]
- [25] 国家环境保护总局. HJ/T 164 – 2004. 地下水环境监测技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004. [State Environmental Protection Administration. HJ/T164—2004. Technical specifications for environmental monitoring of groundwater[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004. (in Chinese)]
- [26] 代雪静, 田卫. 水质模糊评价模型中赋权方法的选择[J]. 中国科学院研究生院学报, 2011, 28(2): 169 – 176. [DAI X J, TIAN W. Choice of determining weights method in fuzzy synthetic evaluating model for water quality[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011, 28(2): 169 – 176. (in Chinese)]
- [27] 蔡子昭, 许广明, 张礼中, 等. 基于数据库和GIS的水质模糊综合评价模型[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 65 – 68. [CAI Z Z, XU G M, ZHANG L Z, et al. Fuzzy comprehensive water quality assessment model based on database and GIS[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 65 – 68. (in Chinese)]
- [28] 陈耀辉, 孙春燕. 对最大隶属原则有效度的进一步研究[J]. 重庆师范学院学报(自然科学版), 2002, 19(1): 47 – 49. [CHEN Y H, SUN C Y. Further study of validity for the maximum subordination principle[J]. Journal of Chongqing Normal Teachers College(Natural Science Edition), 2002, 19(1): 47 – 49. (in Chinese)]
- [29] 柳军. 模糊综合评价在水环境质量评价中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003. [LIU J. Applying fuzzy synthesise evaluation in the study of water environment quality assessment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2003. (in Chinese)]
- [30] 中华人民共和国国土资源部. GB/T 14848—2017. 地下水质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [People's Republic of China Ministry of Land and Resources. GB/T 14848—2017. Groundwater Quality Standards[S]. Beijing: China Standard Press, 2017. (in Chinese)]
- [31] 倪天翔, 杨庆, 王俊豪, 等. 一种新内梅罗指数法的修正方法及应用[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2): 171 – 174. [NI T X, YANG Q, WANG J H, et al. A new improvement of Nemero index method and its application[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2): 171 – 174. (in Chinese)]

编辑: 张若琳